

# KONSTRUKCJA WYŁĄCZNIKA PRÓŻNIOWEGO NA NAPIĘCIU 7,2 kV

**Artur Hejduk**

Instytut Elektrotechniki, Zakład Wysokich Napięć

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono konstrukcję wyłącznika próżniowego 7,2 kV wyposażonego w niezależne napędy elektromagnesowe na każdy biegun. Ponadto omówiono wyniki prac projektowo – konstrukcyjnych oraz wyniki symulacji i badań.

**Słowa kluczowe:** wyłącznik próżniowy, napęd elektromagnesowy, magnesy trwałe

## CONSTRUCTION OF VACUUM CIRCUIT-BREAKER FOR 7.2 kV

**Abstract.** The paper presents the construction of vacuum circuit-breaker 7.2 kV with electromagnetic independent drive for each pole. The drives of new construction are equipped with permanent magnets. Simulations and tests results are presented.

**Keywords:** vacuum circuit-breaker, electromagnetic drive, permanent magnets

### Wstęp

Aparaty łączeniowe tj. wyłączniki, rozłączniki i styczniki, odgrywają ważną rolę w systemie energetycznym. Wykorzystywane są do załączania i wyłączania prądów roboczych, a także do pracy w stanach awaryjnych tzn. wystąpienia zwarcia. Poprawna ich praca ma wpływ na bezpieczeństwo osób, obsługi stacji i rozdzielnic a także zapewniają ochronę urządzeń elektrycznych od skutków działania sił elektrodynamicznych powstałych w wyniku zwarcia.

Ze względu na swoje zalety łączniki próżniowe są powszechnie stosowane w sieciach rozdzielczych średniego napięcia SN. Przewaga łączników próżniowych polega m.in. na zapewnieniu dużej wytrzymałości dielektrycznej przy małych odległościach styków komór próżniowych, na ich dużej trwałości łączeniowej oraz niezależności parametrów łącznika od czynników zewnętrznych takich, jak temperatura. Dzięki odizolowaniu łuku od otoczenia podczas procesów łączeniowych, a także dzięki krótkim czasom łączenia prądu (wyłączanie następuje w pierwszej półfali prądu) stanowią one interesującą alternatywę dla rozwiązań gdzie wymagana jest zwiększona niezawodność działania i ochrona środowiska naturalnego [7, 9, 10].

Wyłącznik próżniowy został opracowany na napięcie sieci 7,2 kV, wykorzystywane m.in. w górnictwie. W niniejszym artykule omówiono konstrukcję wyłącznika próżniowego 7,2 kV na prąd znamionowy 630 A i prąd wyłączalny 10kA.

### 1. Zarys projektu

W latach 2009–2013 w Instytucie Elektrotechniki przy współpracy z Instytutem Tele- i Radiotechnicznym opracowano wyłącznik m.in. jego komory próżniowe oraz napęd elektromagnetyczny z podtrzymaniem magnesami trwałymi. W komorach próżniowych zastosowano styki ze znaczną składową promieniową pola magnetycznego. Składowa promieniowa pola wymusza przemieszczenie łuku na zewnątrz powierzchni styku i przy współdziałaniu składowej obwodowej pola powodują rotację łuku, minimalizując proces wypalania powierzchni nakładek, a tym samym zapewnia zwiększenie trwałości łączeniowej komory. Rozkład składowych pola magnetycznego był mierzony za pomocą sond pomiarowych. Uzyskany w ten sposób obraz rozkładu pola był porównywany z wynikami obliczeń wykonanych w programie Maxwell 3D [1].

Następnie układ stykowy badano w rozbiornalnej komorze próżniowej, w której obserwowano proces wyłączania prądu zwarcowego [11]. Komora wyposażona była w zespół pomp próżniowych, zapewniający uzyskanie próżni na poziomie  $10^{-6}$  mbar. Proces palenia się łuku elektrycznego rejestrowany był kamerą do zdjęć szybkich (rys. 1). Badania miały na celu określenie zdolności wyłączalnej styków. Przykładowy fotogram łuku łączeniowego pokazano na rysunku 2.

Komory próżniowe poddano kondycjonowaniu napięciem udarowym i wolnozmiennym oraz próbom wytrzymałości elektrycznej.

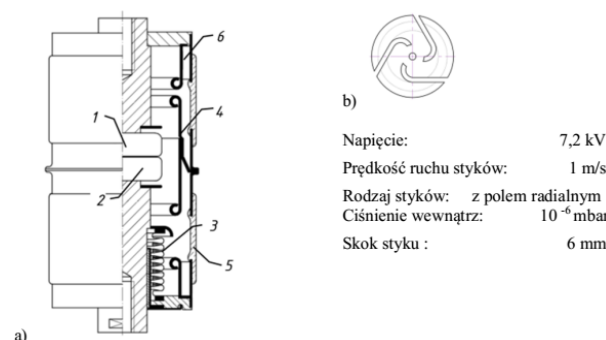
Na rysunku 3 przedstawiono widok komory wyłącznikowej w osłonie szklanej oraz widok nakładki stykowej.



Rys. 1. Stanowisko badawcze (widok kamery szybkiej rejestrującej układ stykowy w komorze rozbiornalnej)



Rys. 2. Wyłączanie prądu zwarcowego 10 kA (widok palącego się łuku między rozchodzącymi się stykami komory) – przykładowy fotogram z prób



Rys. 3. a) komora wyłącznikowa HVK630S/7,2 w stanie zamkniętym, b) widok styku 1 – styk nieruchomy, 2 – styk ruchomy, 3 – mieszek dylatacyjny, 4 – ekran, 5 – osłona izolacyjna, 6 – ekrany do sterowania pola elektrycznego

Wyłącznik posiada niezależny napęd elektromagnesowy na każdy biegun, który ma podtrzymanie w skrajnych położeniach magnesami trwałymi [3]. Projekt napędu obliczono dla założonych prędkości działania z uwzględnieniem siły sprężyn dociskających styki w komorze próżniowej oraz masy elementów napędu [4].

Opracowano model komputerowy z wykorzystaniem oprogramowania do modelowania przestrzennego Alibre Design. Wykonano symulacje komputerowe rozkładu sił i prędkości działania, uwzględniając: wymiary elementów składowych i ich masy, siły działające w układzie, oraz dostarczoną energię. Symulacje wykonano w programie AutoDesk Inventor, Algor Simulation oraz Flux 2D. Dzięki wykonanym obliczeniom udało się uniknąć błędów jakie mogłyby się pojawić w fazie projektowania konstrukcji napędu wyłącznika. Gotowy aparat poddano badaniom wg: wymagań normy PN-EN 62271-100:2009 [6].

## 2. Opis budowy wyłącznika 7,2 kV/ 630 A/ 12 kA

### 2.1. Charakterystyka urządzenia

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry wyłącznika.

Tabela 1. Podstawowe parametry wyłącznika

| Parametry znamionowe                     | Jednostki | Wartość  |
|--|-----------|----------|
| Napięcie znamionowe                      | kV        | 7,2      |
| Prąd znamionowy                          | A         | 630      |
| Prąd zwarciový wyłączalny                | kA        | 12,5     |
| Napięcie probiercze (sieciowe/ udarowe)  | kV        | 23/70    |
| Siła docisku styków                      | N         | 950      |
| Siła trzymania napędów zamknięty/otwarty | N         | 1200/900 |
| Skok styków/napędu                       | mm        | 6 / 9    |
| Średnica komory próżniowej               | mm        | 65       |

Wyłącznik przedstawiono na rysunku 4.

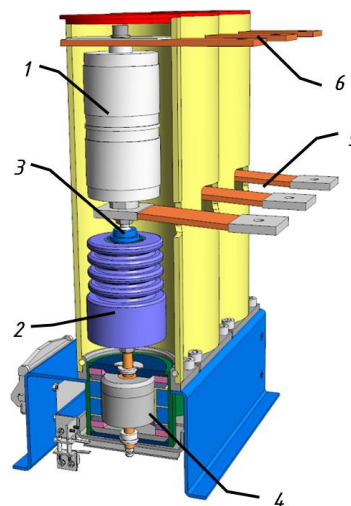
Wyłącznik ma budowę kolumnową. Osłony biegunów, wykonane z rur szkło-epoksydowych, ustawiono na podstawie, wykonanej z blachy stalowej. Wewnątrz osłony bieguna znajduje się komora próżniowa z wyprowadzeniami (dolne wyprowadzenie w formie złącza elastycznego) oraz izolator ze sprężyną stykową. Umieszczenie sprężyny stykowej w izolatorze pozwala na zmniejszenie wysokości bieguna. Sprężyna stykowa zapobiega odskokom styków przy zamykaniu co mogłoby skutkować wszczepianiem się styków. Skok napędu zapewnia wymagany zakres ruchu styku ruchomego oraz docisk sprężyny stykowej.

Napędy umieszczone są w aluminiowych cylindrycznych obudowach. Każdy napęd ma po dwie cewki: złączającą i wyłączającą, parę magnesów oraz nabiegunniki tworzące obwód magnetyczny. Magnesy zapewniają odpowiednią siłę trzymania zwory w krańcowych położeniach (rys. 5).

W stanie załączenia podanie impulsu napięciowego na cewkę otwierającą powoduje rozmagnesowanie obwodu magnetycznego zawierającego górny magnes, oraz ruch zwory w kierunku rozejścia się styków. W pierwszej fazie ruchu rozpędza się część ruchoma zwory, a następnie odrywana jest druga część zwory. Siła trzymania górnego magnesu musi zapewnić styczność oraz docisk sprężyny stykowej.

W stanie wyłączenia magnes dolny musi zapewnić trzymanie otwartego styku ruchomego, który wskutek różnicy ciśnień powietrza otaczającego i próżni w komorze, usuwa się zamknąć. Podanie impulsu napięciowego na cewkę zamykającą powoduje rozmagnesowanie obwodu magnetycznego zawierającego dolny magnes i ruch zwory w kierunku zamknięcia się styków.

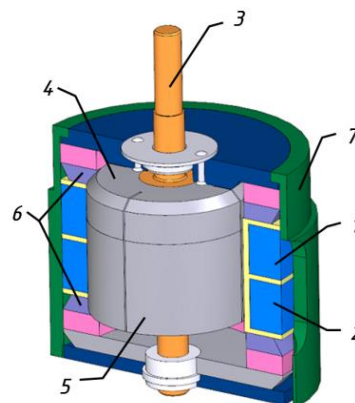
Na rysunku 5 pokazano widok napędu wyłącznika próżniowego.



Rys. 4. Widok bieguna wyłącznika 7,2 kV/ 630 A/ 12 kA 1 – komora próżniowa, 2 – izolator, 3 – mocowanie sprężyny stykowej, 4 – napęd elektromagnesowy, 5 – wyprowadzenie styku ruchomego (złącze elastyczne), 6 – tor prądowy górny

Tabela 2. Wymiary gabarytowe wyłącznika

| Wymiary              | Wartość |
|----------------------|---------|
| Szerokość:           | 320 mm  |
| Wysokość:            | 390 mm  |
| Głębokość:           | 160 mm  |
| Podziałka biegunowa: | 105 mm  |



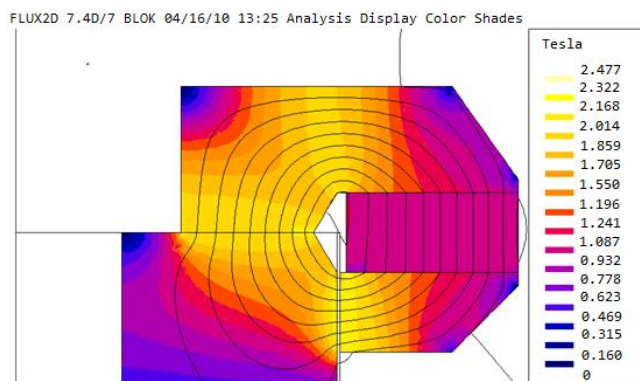
Rys. 5. Przekrój napędu bezjarzmowego z magnesami trwałymi (patent nr 200110): 1 – cewka złączająca, 2 – cewka wyłączająca, 3 – wałek, 4 – część ruchoma zwory elektromagnesu, 5 – część zwory trwale połączona z wałkiem, 6 – nabiegunniki, 7 – osłona aluminiowa

Prędkość ruchu styków zależy od parametrów obwodu zasilającego. Siła trzymania napędu zależy od kształtu elementów obwodu magnetycznego.

Sposób montażu wyłącznika jest prosty i zapewnia powtarzalność uzyskania takiego docisku sprężyny stykowej w każdym biegunie. Wstępny docisk sprężyny wynosi około 900 N. Elementy bieguna montowane są na zewnątrz i osadzone w osłonie izolacyjnej.

### 2.2. Obliczenia i symulacje

W programie Flux 2D zostały wykonane obliczenia indukcji magnetycznej wytwarzanej przez magnesy trwałe (rys. 6). Przez dobór kształtu nabiegunników możemy zmieniać siły trzymania napędu w skrajnych położeniach zwory.

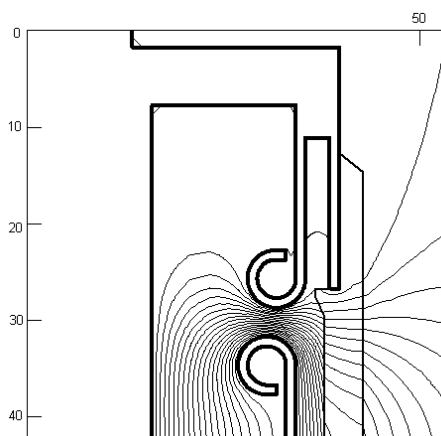


Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej w stanie zamkniętym wyłącznika [3]

Obliczenia elektromagnesu wykonano pod kątem zoptymalizowania parametrów cewek napędu, dzięki czemu możliwe było zmniejszenie energii jaką należy dostarczyć. Źródłem tej energii jest bateria kondensatorów.

W fazie projektowania komory próżniowej bazowano na obliczeniach rozkładu pola elektrycznego. W tym celu wykorzystano program POLE [8] opracowany w Zakładzie Wielkich Mocy wykorzystujący metodę elementów skończonych. Celem obliczeń było optymalne zmniejszenie naprężeń elektrycznych w komorze próżniowej, jak i optymalizacja wymiarów i kształtu poszczególnych elementów. Na rysunku 7 przedstawiono rozkład pola elektrycznego w komorze próżniowej w pobliżu styku nieruchomego.

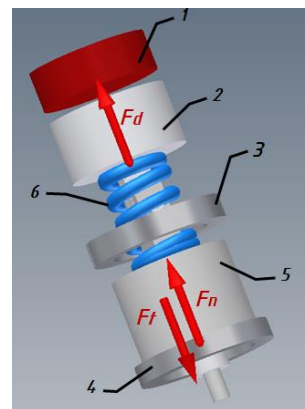
Program POLE wykorzystano także do opracowania izolatora.



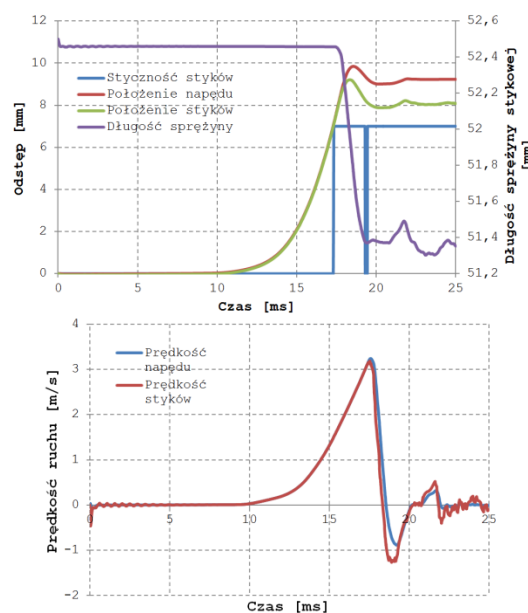
Rys. 7. Rozkład pola elektrycznego w sąsiedztwie styku nieruchomego w górnej części komory próżniowej (porównaj rysunek 3)

Wykonano symulacje ruchu elementów bieguna aparatu. Przyjęto geometrie elementów tak aby ich masa odpowiadała masie rzeczywistych elementów oraz kinematykę całego układu. Zachowano odstępy między poszczególnymi detalami oraz zdefiniowano wzajemne oddziaływanie elementów składowych napędu. Do części ruchomej napędu przyłożono siłę, która uzależniona jest od prądu płynącego w obwodzie oraz od geometrii napędu (szczelina powietrzna w obwodzie strumienia magnetycznego). Prąd w cewce zmienia się w czasie i jest zależny od wartości pojemności kondensatorów i napięcia ładowania oraz parametrów cewki. Model układu wykorzystany do symulacji ruchu został pokazany na rys. 8. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe charakterystyki ruchu podczas zamykania.

Porównanie wartości otrzymanych z symulacji z wartościami zmierzonymi zestawiono w tabeli 3.



Rys. 8. Model układu do wyznaczenia charakterystyk mechanicznych ( $F_n$  – siła napędu,  $F_t$  – siła trzymania magnesów trwałych,  $F_d$  – siła dodatkowa, 1 – styk stały, 2 – styk ruchomy, 3, 4 – magnes trwały, 5 – zwora, 6 – spręż. stykowa)



Rys. 9. Przykładowe przebiegi charakterystyk mechanicznych napędu oraz styku ruchomego podczas zamykania styków

Tabela 3. Porównanie parametrów ruchu styków

|                             | Symulacja | Pomiary  |
|-----------------------------|-----------|----------|
| Czas własny zamykania       | 17,3 ms   | 17,7 ms  |
| Czas własny otwierania      | 6,5 ms    | 7,3 ms   |
| Średnia prędkość zamykania  | 1,94 m/s  | 1,4 m/s  |
| Średnia prędkość otwierania | 1,1 m/s   | 0,64 m/s |

### 3. Badania wyłącznika

Wyłącznik badano na zgodność z wymaganiami normy wg PN-EN 62271-100:2009:

- próby mechaniczne (charakterystyki odniesienia drogi styków).
- próba izolacji,
- pomiar rezystancji obwodu głównego,
- pomiar temperatury i przyrostu temperatury,
- próby zwarciowej zdolności łączeniowej.

Podczas badań mechanicznych sprawdzano parametry ruchu tj. prędkości otwierania i zamykania, czasy własne, jednoczesność ruchu styków oraz czas trwania odskoków. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 4.



Tabela 4. Zestawienie parametrów wyłącznika

| Operacja   | Czas własny | Prędkość ruchu | Pojemność i napięcie ładowania kondensatorów | Jednoczesność ruchu styków |
|------------|-------------|----------------|--|----------------------------|
| Zamykanie  | 12 ms       | 1,4 m/s        | 10 mF, 300 V                                 | 0,3–0,5 ms                 |
| Otwieranie | 6 ms        | 0,65 m/s       | 8,8 mF, 300 V                                |                            |

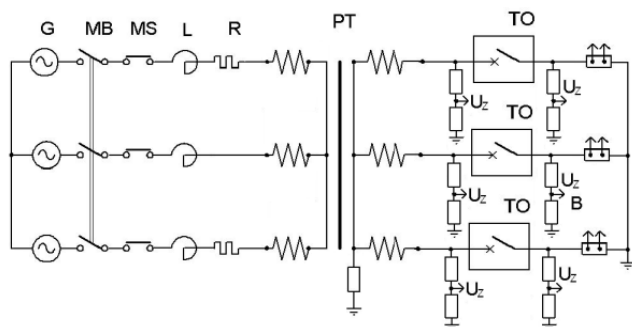
Czas trwania odskoków przy zamykaniu: nie przekraczał 2,5 ms. Podczas badań trwałości mechanicznej wyłącznik wykonał 17000 cykli Z-W. Po zakończeniu prób wykonano pomiar ruchu styków oraz prędkości ruchu zwory i nie zaobserwowano zmian w stosunku do przebiegów zarejestrowanych w pierwszych cyklach łączeniowych.

Badania wytrzymałości elektrycznej wykonano napięciem 23 kV 50Hz oraz 60 kV napięciem udarowym 1,2/50  $\mu$ s. W czasie prób nie wystąpiły przeskoki ani przebicia izolacji.

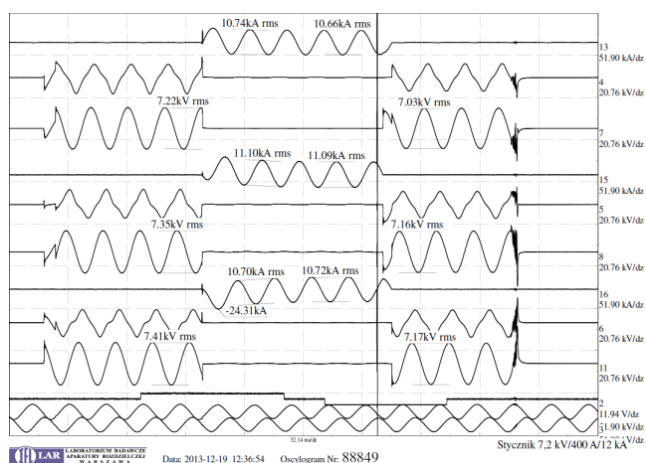
Wartości rezystancji toru prądowego mierzona pomiędzy zaciskami doprowadzającymi i odprowadzającymi przed i po próbie nagrzewania. Wyniki podano w tabeli 5.

Tabela 5. Wartość rezystancji zmierzona przed i po próbie nagrzewania

| Wartość rezystancji     |              | L1          | L2          | L3          |
|-------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|                         |              | $\mu\Omega$ | $\mu\Omega$ | $\mu\Omega$ |
| Przed próbą nagrzewania |              | 36,8        | 36,0        | 36,5        |
| Po próbie nagrzewania   |              | 36,0        | 37,5        | 34,2        |
| Różnica pomiaru         | zmierzona    | -2,2 %      | 4 %         | -6,7 %      |
|                         | dopuszczalna | 20 %        | 20%         | 20 %        |



Rys. 10. Schemat układu probierczego podczas badań zdolności łączeniowej (G – generator, MB – wyłącznik bezpieczeństwa, MS – wyłącznik zamykający, L – dławik, R – rezystor, PT – transformator, TO – obiekt badany,  $U_z$  – pomiar napięcia, B – pomiar prądu)



Rys. 11. Przykładowy oscylogram z próby zdolności łączeniowej

Nagrzewanie toru prądowego wykonano, zgodnie z założeniem, prądem znamionowym wyłącznika wynoszącym 630 A. Stabilizacja temperatury nastąpiła po czasie 3 godz. 50 min. na poziomie 37 K, poniżej dopuszczalnego przyrostu temperatury wynoszącego 65 K.

Badania zwarciowej zdolności łączeniowej wykonano w Laboratorium Zwarciovym Instytutu Elektrotechniki. Schemat układu probierczego do badań łączenia prądu zwarciowego pokazano na rys. 10.

Przykładowy oscylogram wyłączenia prądów zwarcia pokazano na rysunku 11.

#### 4. Wnioski

Wykonane badania wg: PN-EN 62271-100:2009 wskazują na słusność przyjętych rozwiązań. Z uwagi na prostotę konstrukcji, oraz stosunkowo mały koszt wykonania, wyłącznik 7,2 kV jest oryginalnym rozwiązaniem, które można by adaptować dla innych wartości napięć i prądów. Zastosowanie niezależnych napędów na każdy biegun wyłącznika umożliwia synchroniczne sterowanie poszczególnymi biegunami. Wyłączniki synchroniczne stosowane są w celu obniżenia poziomu przepięć podczas łączenia prądów pojemnościowych, linii długich i prądów indukcyjnych [2, 5].

Projekt UDA-POIG.01.03.01-14-125-09-00 „Opracowanie nowej generacji łączników dla dystrybucji energii elektrycznej średniego napięcia” był realizowany przez Instytut Elektrotechniki przy współpracy Instytut Tele- i Radiotechniczny i był współfinansowany z funduszy unijnych z programu „Innowacyjna gospodarka”. Szczegółowe informacje oraz listę osób biorący udział w projekcie można znaleźć w materiałach informacyjnych na stronie projektu.

#### Literatura

- [1] Budzisz J., Wróblewski Z.: Zjawisko niejednoczesności otwierania styków w łączniku próżniowym. Przegląd Elektrotechniczny 2/2014, 209–212.
- [2] Dzierżyński A.: Opracowanie napędu elektromagnesowego do stycznika na napięcie 7,2 kV – Dokumentacja techniczna nr 7416/NWM/10.
- [3] Dzierżyński A.: POLE – program do obliczeń rozkładu pola elektrycznego w układach płaskich i o symetrii obrotowej – Instytut Elektrotechniki.
- [4] Falkingham L. T.: The Strengths and Weaknesses of Vacuum Circuit Breaker Technology. XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2012.
- [5] Furgał J., Tokarz P.: Wpływ synchronizacji łączy na przepięcia łączeniowe w układach elektroenergetycznych. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 30/2011, 41–47.
- [6] Hejduk A.: Wybrane zagadnienia z badań i projektowania komór próżniowych. Prace Instytutu Elektrotechniki 246/2010, 143–151.
- [7] Krasuski K.: Porównanie modeli numerycznych i fizycznych styków komór próżniowych. Prace Instytutu Elektrotechniki 246/2010, 185–194.
- [8] Piotrowska-Kokot E., Dzierżyński A., Sibilski H.: Napęd elektromagnetyczny cylindryczny z magnesem trwałym, patent nr 200110.
- [9] PN-EN 62271-100:2009 – Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza – Część 100: Wyłączniki wysokiego napięcia prądu przemiennego.
- [10] Sibilski H., Dzierżyński A., Hejduk A., Krasuski K., Grodziński A., Szymański A.: Badanie właściwości magnetycznych styków komór próżniowych. Materiały konferencyjne, Łączniki 2010.
- [11] Slade P. G.: The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application. CRC Press 2008.

Mgr inż. Artur Hejduk

e-mail: hejduk@iel.waw.pl

Ukończył w roku 2003 Wydział Elektryczny na Politechnice Warszawskiej. Rozpoczął prace w Laboratorium Aparatury Rozdzielczej biorąc udział w badaniach aparatów i urządzeń elektrycznych. Od 2007 r. pracuje w Zakładzie Wielkich Mocy przy projektowaniu i badaniu aparatury średniego napięcia. Otrzymał stypendium z urzędu marszałkowskiego województwa Mazowieckiego oraz 2 nagrody od Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



otrzymano/received: 15.06.2016

przyjęto do druku/accepted: 01.06.2017